

УДК 621.314.58

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ  
И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ  
ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ  
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

**П.Н. Смирнов, С.А. Харитонов, Е.Б. Преображенский**  
*Новосибирский государственный технический университет*

Рассматривается возможность компенсации емкостных токов короткого замыкания с помощью полупроводникового преобразователя в сети среднего напряжения с изолированной нейтралью. Полупроводниковый преобразователь работает параллельно сети среднего напряжения и играет роль управляемого источника тока нулевой последовательности. В случае короткого замыкания преобразователем создается ток для компенсации емкостного тока короткого замыкания. Предложена математическая модель системы в базисе фазных переменных для анализа электрических процессов, происходящих в различных режимах сети. Математическая модель преобразователя представлена с помощью коммутационных функций в виде эквивалентных управляемых источников несинусоидального тока. В качестве примера рассмотрен режим однофазного «металлического» короткого замыкания с компенсацией емкостного тока. Получены аналитические соотношения для токов сети в режиме короткого замыкания с преобразователем.

*Ключевые слова:* сеть с изолированной нейтралью, компенсация емкостного тока, полупроводниковый преобразователь, анализ электрических процессов, математическое моделирование.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-1-80-93

### Введение

В нормальном режиме работы потенциал нейтральных точек относительно земли равен нулю и не влияет на величину линейных напряжений, а следовательно, и на работу потребителей [1]. В аварийных режимах работы технические и экономические показатели электрических сетей зависят от способа заземления нейтрали. Режимы нейтрали непосредственно влияют на такие параметры и процессы, как стоимость изоляции линии и оборудования, стоимость заземляющих устройств, возможность распространения повреждения на оборудование нагрузки при однофазных замыканиях на землю, надежность электроснабжения, возможность возникновения в сети опасных феррорезонансных и резонансных процессов, условия безопасности обслуживания электроустановок, реализацию и функционирование устройств защиты от замыканий на землю [2], величину тока в месте повреждения при однофазном замыкании на землю.

В мировой практике используются следующие способы заземления нейтрали сетей среднего напряжения:

- изолированная (незаземленная);
- глухозаземленная (непосредственно присоединенная к заземляющему контуру);

---

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0198, уникальный идентификатор ПНИЭР – RFMEFI57715X0198).

- заземленная через дугогасящий реактор;
- заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный);
- комбинированное заземление (через дугогасящий реактор и резистор).

В российской энергетике в режиме изолированной нейтрали работают сети 6, 10 и 35 кВ. Наиболее экономически выгодным режимом для сетей 6–35 кВ является режим изолированной нейтрали за счет возможности работы таких сетей в условиях однофазного короткого замыкания. Сети с напряжением 110 кВ и выше работают в режиме глухозаземленной нейтрали и отключаются в случае короткого замыкания устройствами релейной защиты.

Несмотря на возможность работы сети с изолированной нейтралью в условиях короткого замыкания, существует ряд причин, по которым режим однофазного замыкания на землю должен быть устранен:

- вероятность возникновения двухфазного короткого замыкания по причине увеличения напряжений на неповрежденных фазах до величины линейных (в  $\sqrt{3}$  раз);
- вероятность поражения электрическим током людей, находящихся вблизи точки замыкания (напряжение шага и касания);
- вероятность протекания однофазного короткого замыкания в виде электрической дуги, с дополнительными перенапряжениями и повреждениями оборудования.

Для устранения описанных проблем применяют режимы компенсированной нейтрали с заземлением через дугогасящий реактор или резистор. Однако, как показал опыт эксплуатации, заземление нейтрали через дугогасящий реактор обладает рядом недостатков, таких как:

- возникновение дуговых перенапряжений при значительной расстройке компенсации реактора;
- наличие механических частей, требующих постоянного обслуживания и отсутствие автоматических регуляторов для управления;
- большой расход электротехнических материалов (медь, электротехническая сталь), большие масса и габариты;
- необходимость применения специального устройства для генерации тестовых напряжений на нейтрали трансформатора (для определения величины текущей емкости).

В случае заземления нейтрали через высокоомный или низкоомный резистор главным недостатком является отключение присоединения при возникновении короткого замыкания. В последнее время популярным является комбинированное заземление нейтрали сети, но, как показано в [3], такое заземление не снижает уровень дуговых перенапряжений в сети в сравнении с заземлением через дугогасящий реактор, но обладает всеми недостатками описанных способов заземления.

Перечисленные недостатки указывают на то, что применяемые способы заземления нейтрали не отвечают современным технико-экономическим требованиям. Одним из перспективных направлений является исследование заземления нейтрали через полупроводниковый преобразователь. В публикациях [4, 5] делаются первые шаги для перехода сетей среднего напряжения к заземлению нейтрали через устройства силовой электроники. Структурная схема включения полупроводникового преобразователя представлена на рис. 1. При возникновении короткого замыкания на землю полупроводниковый преобразователь генерирует ток нулевой последовательности индуктивного характера, который компенсирует емкостную составляющую тока замыкания [6–9].

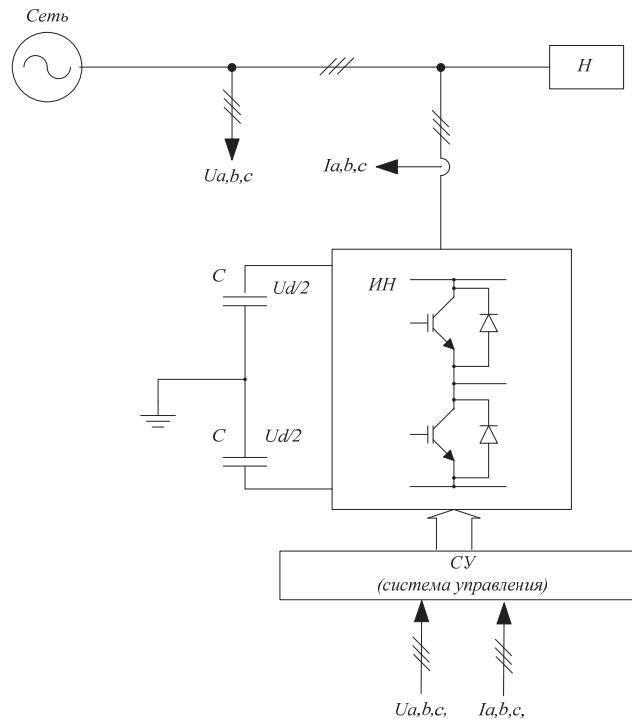


Рис. 1 – Структурная схема устройства

Fig. 1 – Block diagram of the device

В данной статье анализируется возможность компенсации емкостного тока короткого замыкания полупроводниковым преобразователем. Для анализа предлагается математическая модель сети с преобразователем, на основании которой получены аналитические выражения переходных процессов для токов в режиме короткого замыкания и в установившемся режиме.

### 1. Математическая модель сети с изолированной нейтралью

Математическая модель сети с изолированной нейтралью сформирована в базисе фазных переменных  $\vec{F} = [\vec{a} \ \vec{b} \ \vec{c}]$ . В сетях с изолированной нейтралью провода воздушных и кабельных сетей трехфазной системы связаны с землей через емкости и активные сопротивления изоляции, распределенные по длине линии. Параметры схемы замещения для получения предварительных результатов выбраны сосредоточенными. Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью представлена в виде источников трехфазного напряжения  $e_a, e_b, e_c$  (например, понижающий или повышающий трансформатор с соединением обмоток в звезду или треугольник) с внутренним индуктивным  $L_{ai}, L_{bi}, L_{ci}$  и активным  $r_{ai}, r_{bi}, r_{ci}$  сопротивлением,  $C_{ал}, C_{бл}, C_{сл}$  – емкость кабеля относительно земли,  $L_{ал}, L_{бл}, L_{сл}$  – индуктивное сопротивление кабеля,  $r_{ал}, r_{бл}, r_{сл}$  – активное сопротивление кабеля. В общем случае к сети подключено  $n$  нагрузок, представленных в виде противоЭДС  $e_{aн1} \dots e_{aнn}, e_{bн} \dots e_{bнn}, e_{сн} \dots e_{снn}$  и комплексных сопротивлений индуктивного или емкостного характера  $z_{aн} \dots z_{aнn}, z_{bн} \dots z_{bнn}$ ,

$z_{сн} \dots z_{сnn}$ . Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью с  $n$  количеством нагрузок изображена на рис. 2 (активные сопротивления источника и кабеля представлены в индуктивностях).

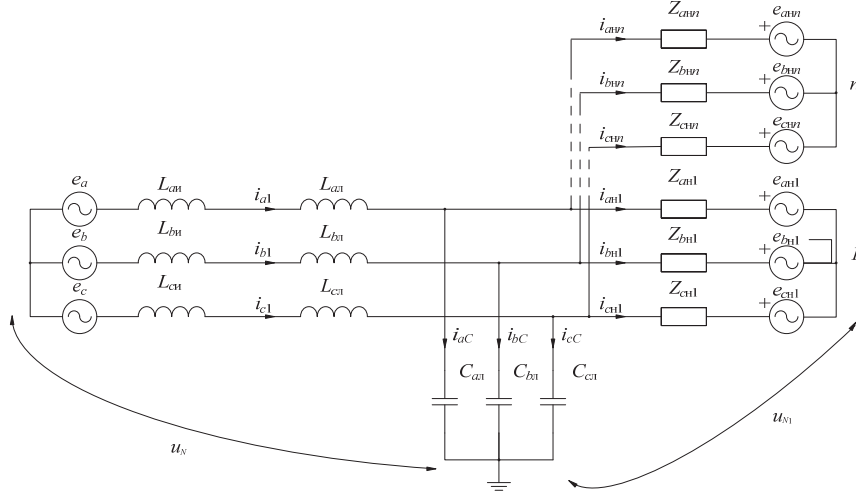


Рис. 2 – Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью  
Fig. 2 – Network equivalent circuit with an isolated neutral

Для составления математической модели в векторной форме были использованы уравнения по законам Кирхгофа [10]. Эквивалентная схема (рис. 2) на основании законов Кирхгофа описывается следующей системой дифференциальных уравнений в матричном виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{E}^F(t) = \mathbf{R}_н \cdot \mathbf{I}_1^F(t) + \mathbf{L}_н \frac{d\mathbf{I}_1^F(t)}{dt} + \mathbf{R}_л \cdot \mathbf{I}_1^F(t) + \mathbf{L}_л \frac{d\mathbf{I}_1^F(t)}{dt} + \mathbf{U}_C^F(t) + \mathbf{U}_N^F(t), \\ \mathbf{E}_{н1}^F(t) = \mathbf{U}_{N1}^F(t) - \mathbf{Z}_{н1} \cdot \mathbf{I}_{н1}^F(t) + \mathbf{U}_C^F(t), \\ \dots \\ \mathbf{E}_{нn}^F(t) = \mathbf{U}_{Nn}^F(t) - \mathbf{Z}_{нn} \cdot \mathbf{I}_{нn}^F(t), \\ \mathbf{I}_1^F(t) = \mathbf{I}_C^F(t) + \mathbf{I}_{н1}^F(t) + \dots + \mathbf{I}_{нn}^F(t), \\ \mathbf{I}_C^F(t) = \mathbf{C} \frac{d\mathbf{U}_C^F(t)}{dt}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I}_1^F(t) = \begin{bmatrix} i_{а1}(t) \\ i_{б1}(t) \\ i_{с1}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{н1}^F(t) = \begin{bmatrix} i_{ан1}(t) \\ i_{бн1}(t) \\ i_{сн1}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{нn}^F(t) = \begin{bmatrix} i_{анn}(t) \\ i_{бнn}(t) \\ i_{снn}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_C^F(t) = \begin{bmatrix} i_{аc}(t) \\ i_{бс}(t) \\ i_{сc}(t) \end{bmatrix}, \\ \mathbf{E}^F(t) = \begin{bmatrix} e_a(t) \\ e_b(t) \\ e_c(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{н1}^F(t) = \begin{bmatrix} e_{ан1}(t) \\ e_{бн1}(t) \\ e_{сн1}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{нn}^F(t) = \begin{bmatrix} e_{анn}(t) \\ e_{бнn}(t) \\ e_{снn}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_C^F(t) = \begin{bmatrix} u_{аc}(t) \\ u_{бс}(t) \\ u_{сc}(t) \end{bmatrix}, \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{U}_N^F(t) &= \begin{bmatrix} u_N(t) \\ u_N(t) \\ u_N(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_{N1}^F(t) = \begin{bmatrix} u_{N1}(t) \\ u_{N1}(t) \\ u_{N1}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_{Nn}^F(t) = \begin{bmatrix} u_{Nn}(t) \\ u_{Nn}(t) \\ u_{Nn}(t) \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{L}_И &= \begin{bmatrix} L_{aИ} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bИ} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cИ} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_Л = \begin{bmatrix} L_{aЛ} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bЛ} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cЛ} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{aЛ} & 0 & 0 \\ 0 & C_{bЛ} & 0 \\ 0 & 0 & C_{cЛ} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{R}_И &= \begin{bmatrix} r_{aИ} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bИ} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cИ} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_Л = \begin{bmatrix} r_{aЛ} & 0 & 0 \\ 0 & r_{bЛ} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cЛ} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z}_{И1} = \begin{bmatrix} Z_{aИ1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{aИ1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{aИ1} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{Z}_{Иn} &= \begin{bmatrix} Z_{aИn} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{aИn} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{aИn} \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

В случае металлического короткого замыкания одна из емкостей заменяется переключкой (рис. 3). В результате одна из фаз оказывается под потенциалом земли, а нейтраль – под фазным напряжением. Ток короткого замыкания  $i_g$  проходит через точку короткого замыкания и через емкости неповрежденных фаз возвращается в источник и нагрузку. В результате происходит перераспределение потенциалов (рис. 4) и токов в системе, но линейное напряжение нагрузки не изменяется и потребитель не чувствует изменений.

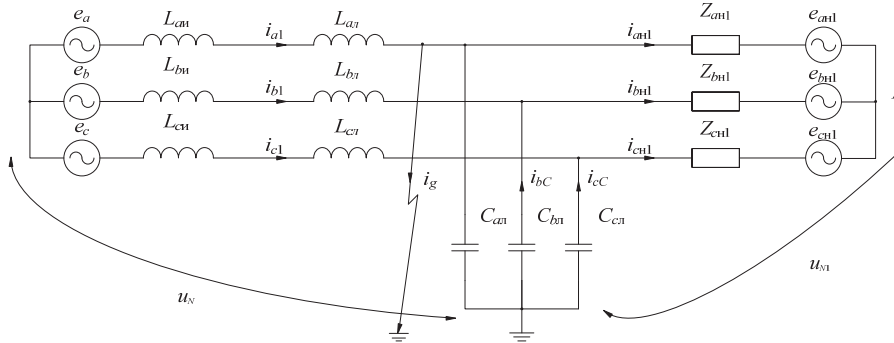


Рис. 3 – Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью в режиме короткого замыкания

Fig. 3 – Network equivalent circuit with an isolated neutral in the short-circuit mode

Для режима короткого замыкания в уравнениях (1)–(3) необходимо сделать замену на

$$\mathbf{U}_C^F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ u_{bC}(t) \\ u_{cC}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_C^F(t) = \begin{bmatrix} i_g(t) \\ i_{bC}(t) \\ i_{cC}(t) \end{bmatrix}. \tag{4}$$

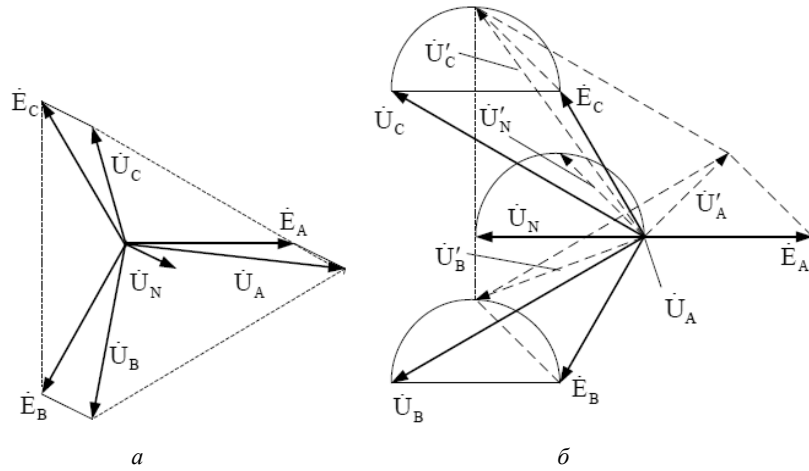


Рис. 4 – Векторные диаграммы до (а) и после (б) короткого замыкания  
 Fig. 4. Vector diagrams before (a) and after (b) short circuit

**2. Математическая модель преобразователя и сети с преобразователем**

Статический преобразователь электрической энергии представлен в виде эквивалентных управляемых источников несинусоидального напряжения (рис. 5).

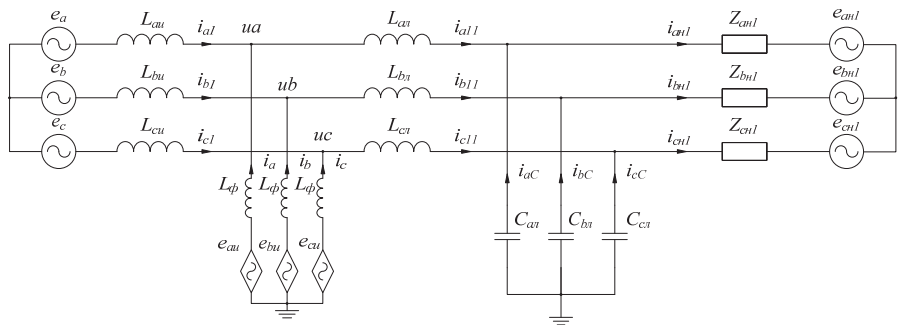


Рис. 5 – Эквивалентная схема сети со статическим преобразователем  
 Fig – 5. The network equivalent circuit with a static converter

Преобразователь электрической энергии можно описать как

$$\mathbf{E}_H^F(t) = \mathbf{\Gamma}^F(t) \frac{Ud}{2} - (1 - \mathbf{\Gamma}^F(t)) \frac{Ud}{2}, \tag{5}$$

где  $\mathbf{E}_H^F = \begin{bmatrix} e_{au} \\ e_{bu} \\ e_{cu} \end{bmatrix}$  – вектор напряжений эквивалентных управляемых источников;

$\mathbf{\Gamma}^F = \begin{bmatrix} \gamma_a \\ \gamma_b \\ \gamma_c \end{bmatrix}$  – коммутационная вектор-функция;  $\frac{Ud}{2}$  – напряжение на конденсаторе (см. рис. 1).

Коммутационные функции определяются следующим образом:

$$\mathbf{\Gamma}^F(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \mathbf{U}_M^F(t) \geq U_{op}(t), \\ -1, & \text{if } \mathbf{U}_M^F(t) < U_{op}(t), \end{cases} \quad (6)$$

где  $\mathbf{U}_M^F = \begin{bmatrix} u_{aM} \\ u_{bM} \\ u_{cM} \end{bmatrix}$  – вектор модулирующих напряжений;  $U_{op}(t)$  – опорное напряжение пилообразной формы.

В установившемся режиме коммутационные функции могут быть представлены в виде рядов Фурье.

Эквивалентная схема замещения (рис. 5) на основании законов Кирхгофа описывается в матричном виде следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \mathbf{E}^F(t) = \mathbf{R}_и \cdot \mathbf{I}_1^F(t) + \mathbf{L}_и \frac{d\mathbf{I}_1^F(t)}{dt} + \mathbf{R}_л \cdot \mathbf{I}_{11}^F(t) + \mathbf{L}_л \frac{d\mathbf{I}_{11}^F(t)}{dt} + \mathbf{U}_C^F(t) + \mathbf{U}_N^F(t), \\ \mathbf{E}_H^F(t) = \mathbf{U}_{N1}^F(t) - \mathbf{Z}_H \cdot \mathbf{I}_H^F(t) + \mathbf{U}_C^F(t), \\ \mathbf{E}^F(t) - \mathbf{L}_\Phi \frac{d\mathbf{I}^F(t)}{dt} - \mathbf{E}_H^F(t) = \mathbf{U}_N^F(t), \\ \mathbf{I}_1^F(t) + \mathbf{I}^F(t) = \mathbf{I}_{11}^F(t), \\ \mathbf{I}_{11}^F(t) = \mathbf{I}_C^F(t) + \mathbf{I}_H^F(t), \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{где } \mathbf{I}_{11}^F(t) = \begin{bmatrix} i_{a11}(t) \\ i_{b11}(t) \\ i_{c11}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}^F(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_\Phi = \begin{bmatrix} L_\Phi & 0 & 0 \\ 0 & L_\Phi & 0 \\ 0 & 0 & L_\Phi \end{bmatrix}.$$

Статический преобразователь создает ток нулевой последовательности, равный 1/3 суммы токов вектора  $\mathbf{I}^F$  в противофазе току короткого замыкания  $i_g$  (см. рис. 3). Для решения системы уравнений (5)–(7) можно применить любой из известных методов решения дифференциальных уравнений. Решение полученных систем уравнений для режимов работы сети с преобразователем и без преобразователя выполнено при следующих допущениях:

- параметры схемы замещения одной величины во всех фазах;
  - сеть работает в режиме холостого хода (при рассмотрении процесса короткого замыкания подключение нагрузки влияет лишь в частных случаях, в несимметричных режимах работы, которые необходимо рассматривать отдельно);
  - система питающих напряжений симметрична и синусоидальна;
  - элементы схемы замещения линейны;
  - преобразователь представлен в виде синусоидальных источников тока.
- Схема замещения при принятых допущениях изображена на рис. 6.

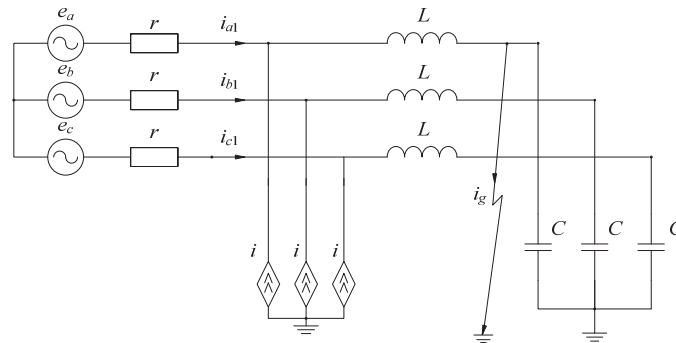


Рис. 6 – Эквивалентная схема замещения для расчета

Fig 6. – An equivalent circuit for calculating

Для решения систем уравнений был использован операторный метод расчета [11]. Решение уравнений (1)–(4) для тока короткого замыкания и сетевых токов выглядит следующим образом:

$$i_{a1}(s) = i_g(s) = \frac{6 \cdot \pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot s}{(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)}; \quad (8)$$

$$i_{b1}(s) = - \frac{\pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot (3 \cdot s + 3 \cdot C \cdot L \cdot s^3 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s^2 - 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot f - 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot L \cdot f \cdot s^2 - 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot r \cdot f \cdot s)}{(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (C \cdot L \cdot s^2 + C \cdot r \cdot s + 1) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)}; \quad (9)$$

$$i_{c1}(s) = - \frac{\pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot (3 \cdot s + 3 \cdot C \cdot L \cdot s^3 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s^2 + 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot f + 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot L \cdot f \cdot s^2 + 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot r \cdot f \cdot s)}{(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (C \cdot L \cdot s^2 + C \cdot r \cdot s + 1) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)}; \quad (10)$$

где  $U_m$  – амплитуда сетевого напряжения;  $L$ ,  $C$ ,  $r$  – эквивалентные индуктивность, емкость и активное сопротивление сети;  $f$  – частота сети;  $s$  – оператор Лапласа.

Графики оригиналов токов, полученных из соотношений (8)–(10), изображены на рис. 7.

В качестве эквивалентных параметров  $L$ ,  $C$ ,  $r$  – индуктивность, емкость и активное сопротивление сети были использованы параметры кабеля на рабочее напряжение 10 кВ длиной 5 км. В момент короткого замыкания присутствует высокочастотный переходной процесс, обусловленный резонансными процессами между емкостью и индуктивностью сети.

Решение системы уравнений (7) операторным методом для сетевых токов при принятых ранее допущениях выглядит следующим образом:

$$i_{a1}(s) = \frac{6 \cdot \pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot s}{(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)} - \frac{2 \cdot s \cdot I_m}{3 \cdot (4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)}; \quad (11)$$



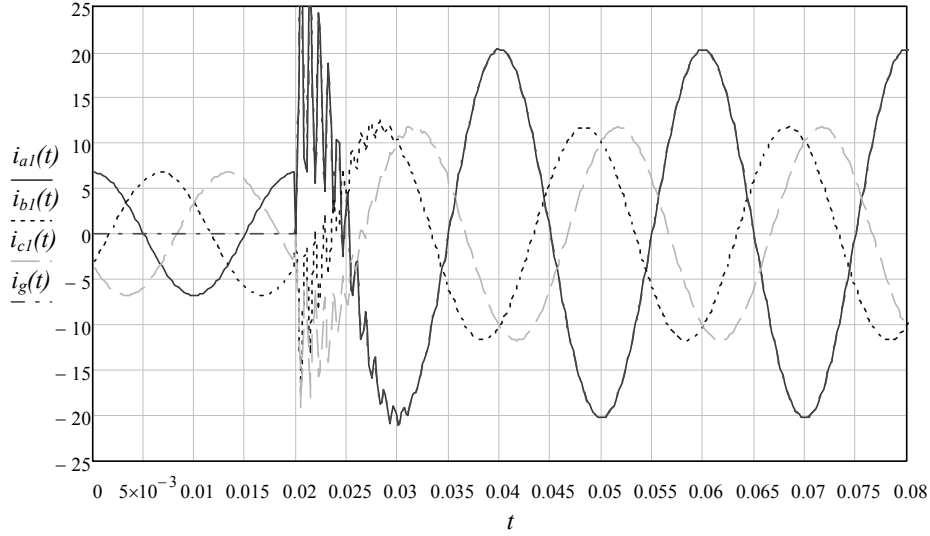


Рис. 7 – Фазные токи сети в режиме короткого замыкания и ток в месте короткого замыкания

Fig. 7 – Network phase currents in the short-circuit mode and the current in the short-circuit location

$$i_{b1}(s) = -\frac{\pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot (3 \cdot s + 3 \cdot C \cdot L \cdot s^3 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s^2 - 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot f - 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot L \cdot f \cdot s^2 - 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot r \cdot f \cdot s)}{(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (C \cdot L \cdot s^2 + C \cdot r \cdot s + 1) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)} + \frac{I_m \cdot s}{3 \cdot (4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)}; \quad (12)$$

$$i_{c1}(s) = -\frac{\pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot (3 \cdot s + 3 \cdot C \cdot L \cdot s^3 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s^2 + 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot f + 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot L \cdot f \cdot s^2 + 6 \cdot \pi \cdot \sqrt{3} \cdot C \cdot r \cdot f \cdot s)}{(4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (C \cdot L \cdot s^2 + C \cdot r \cdot s + 1) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)} + \frac{I_m \cdot s}{3 \cdot (4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 + s^2) \cdot (3 \cdot C \cdot L \cdot s^2 + 3 \cdot C \cdot r \cdot s + 1)}; \quad (13)$$

где  $U_m$  – амплитуда сетевого напряжения;  $I_m$  – амплитуда источников тока;  $L$ ,  $C$ ,  $r$  – эквивалентная индуктивность, емкость и активное сопротивление сети;  $f$  – частота сети;  $s$  – оператор Лапласа.

По отношению к уравнениям (8)–(10) видно, что в уравнениях (11)–(13) появилась часть от тока  $I_m$ , компенсирующая емкостный ток короткого замыкания и выравнивающая сетевые токи.

Графики оригиналов токов, полученных из соотношений (11)–(13), изображены на рис. 8 и 9 с момента времени 0,055 с.

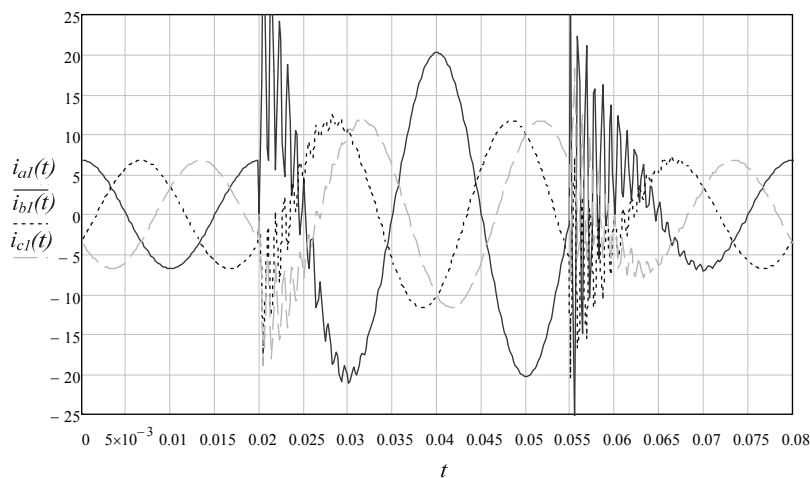


Рис. 8 – Фазные токи сети в режиме короткого замыкания

Fig. 8 – Network phase currents in the short-circuit mode

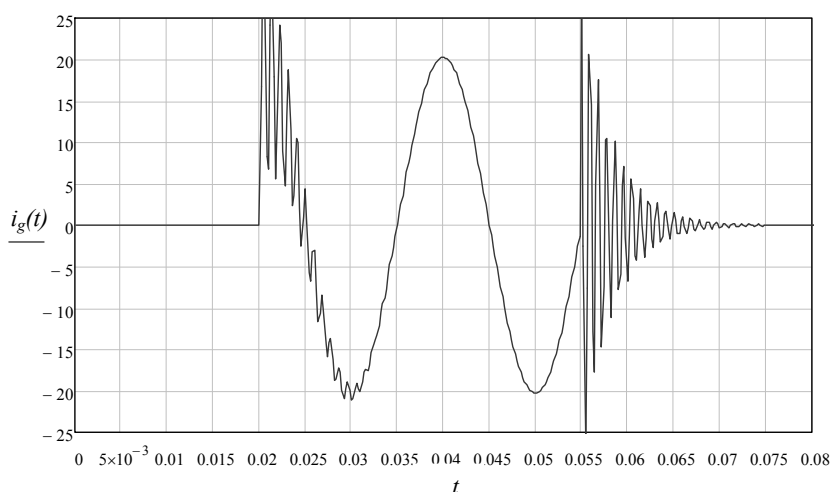


Рис. 9 – Ток в месте короткого замыкания

Fig. 9 – Current in the short-circuit location

В момент времени 0,02 с происходит короткое замыкание, а в момент времени 0,055 с происходит подключение преобразователя, и после переходного процесса ток короткого замыкания становится равным нулю, а сетевые токи выравниваются. При расчете дифференциальных уравнений преобразователь моделировался как источник тока, однако при необходимости гармонический состав можно учесть (согласно уравнениям 5, 6), не учтен переходной процесс регулятора преобразователя.

Решение дифференциальных уравнений операторным методом удобно для расчета переходных процессов, однако для построения зависимости тока короткого замыкания от тока преобразователя в установившемся режиме удобнее получить выражения в символической форме записи [12]. В символической форме записи выражение для тока короткого замыкания в установившемся режиме выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{I}_g = & \left[ \frac{-12 \cdot \pi \cdot C \cdot r \cdot f + 24 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot L \cdot f^2 \cdot \mathbf{j} + 2 \cdot \mathbf{j}}{144 \cdot \pi^4 \cdot C^2 \cdot L^2 \cdot f^4 + 36 \cdot \pi^2 \cdot C^2 \cdot r^2 \cdot f^4 + 24 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot L \cdot f^2 + 1} \right] * I_m + \\ & + \frac{36 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot U_m \cdot C^2 \cdot f^2 + 6 \cdot \pi \cdot C \cdot U_m \cdot f \cdot \mathbf{j} + 72 \cdot \pi^3 \cdot C^2 \cdot L \cdot U_m \cdot f^3 \cdot \mathbf{j}}{144 \cdot \pi^4 \cdot C^2 \cdot L^2 \cdot f^4 + 36 \cdot \pi^2 \cdot C^2 \cdot r^2 \cdot f^4 + 24 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot L \cdot f^2 + 1}, \quad (14) \end{aligned}$$

где  $U_m$  – амплитуда сетевого напряжения;  $I_m$  – амплитуда источников тока;  $L$ ,  $C$ ,  $r$  – индуктивность, емкость и активное сопротивление сети;  $f$  – частота сети;  $\mathbf{j}$  – мнимая единица.

Вторая часть уравнения определяет величину тока короткого замыкания, а первая – добавку от тока нулевой последовательности преобразователя. Выражение (14) показывает, что при любом токе короткого замыкания можно найти величину  $I_m$ , при которой происходит компенсация тока короткого замыкания. Выразив  $I_m$  из выражения (14), можно аналитически вычислить необходимую величину тока компенсации:

$$I_m = \left( -3 \cdot \pi \cdot C \cdot r \cdot f - 6 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot L \cdot f^2 \cdot \mathbf{j} - \frac{\mathbf{j}}{2} \right) \dot{I}_g + 3 \cdot \pi \cdot C \cdot U_m \cdot f, \quad (15)$$

где  $\dot{I}_g$  – комплекс тока короткого замыкания.

Для наглядности, построена зависимость амплитуды тока короткого замыкания от величины амплитуды тока фазы преобразователя (14), изображенная на рис. 10.

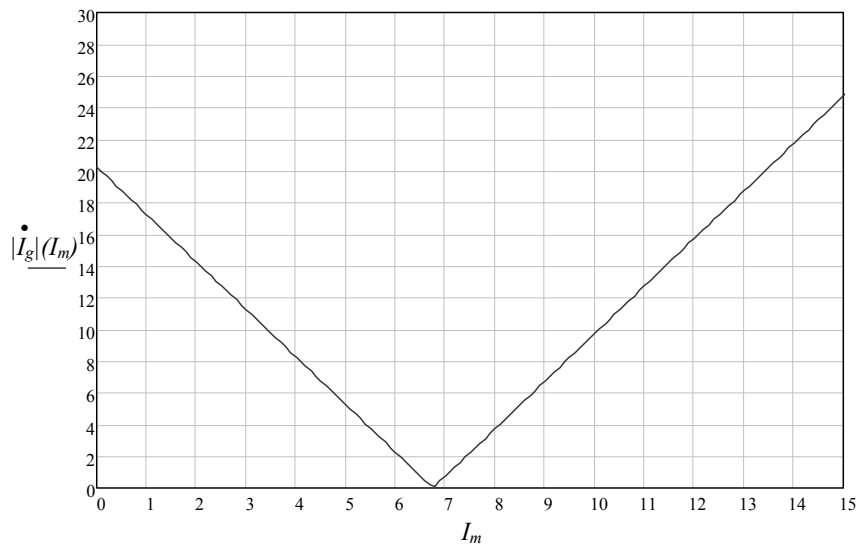


Рис. 10 – Зависимость тока короткого замыкания от величины тока фазы преобразователя

Fig. 10 – Dependence of the short-circuit current on the value of the phase current of the converter

Из рисунка видно, что зависимость имеет явно выраженный резонансный характер и очевидно, что для полной компенсации емкостного тока необходима точная величина тока нулевой последовательности. Очевидно, что при нулевом

токе компенсации ток короткого замыкания имеет номинальное значение (рис. 6–8). Таким образом, дискретность управления дугогасящими реакторами не позволяет обеспечить полную компенсацию тока короткого замыкания.

### Заключение

Применение статического преобразователя в сетях с изолированной нейтралью позволяет решить задачу компенсации емкостного тока без отключения потребителей. Получено выражение для аналитического вычисления величины тока компенсации. Применение статического преобразователя позволяет создать универсальное устройство для компенсации емкостного тока, обладающее высоким быстродействием, надежностью и низкими массогабаритными показателями в сравнении с дугогасящими реакторами. Представленная математическая модель сети с преобразователем позволяет проанализировать электромагнитные процессы в сети и оценить влияние преобразователя на эти процессы, а также при необходимости провести гармонический анализ искажений вносимых преобразователем, выбрать выходной фильтр для минимизации этих искажений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.** Режимы заземления нейтрали в электрических системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 108 с.
2. **Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М.** Режимы нейтрали электрических сетей. – Киев: Наукова думка, 1985. – 264 с.
3. **Назарычев А.Н., Пугачев А.А., Титенков С.С.** Комбинированное заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ. Мифы и реальность // Новости электротехники. – 2016. – № 3 (99). – С. 2–5.
4. Патент 252434 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/26, Н 02 М 7/44. Устройство компенсации тока замыкания на землю в трехфазных электрических сетях (варианты) / Г.М. Мустафа. – № 2012119729/07; заявл. 15.05.2012; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21.
5. **Komrska T., Peroutka Z., Matuljak I.** A novel least norm-based PWM for a four-leg earth fault compensator // Proceedings IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Dallas, TX, 2014. – P. 1118–1123.
6. Патент 148769 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 9/08, Н 02 М 7/44. Устройство для компенсации емкостных токов короткого замыкания в сетях с изолированной нейтралью 6–10 кВ / П.Н. Смирнов, С.А. Харитонов, Е.Б. Преображенский. – № 2014130836/07; заявл. 24.07.2014; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35.
7. Патент 2626011 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 9/08, Н 02 М 7/44. Устройство для компенсации емкостных токов короткого замыкания в сетях с изолированной нейтралью 6–10 кВ / П.Н. Смирнов, С.А. Харитонов, Е.Б. Преображенский. – № 2015122324; заявл. 10.06.2015; опубл. 21.07.2017, Бюл. № 21.
8. **Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrajensky E.B.** Symmetrical current components regulator // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Proceedings, Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 473–476.
9. **Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrajensky E.B.** Compensation of ground fault capacitive current in ungrounded distribution networks by static semi-conductor converter // 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Proceedings, Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk, 2014. – P. 573–576.
10. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
11. **Левинштейн М.Л.** Операционное исчисление в задачах электротехники. – Изд. 2-е, доп. – Л.: Энергия, 1972. – 360 с.
12. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники. В 2 т. Т. 1: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.

**ANALYSIS OF PROCESSES IN A NETWORK WITH AN ISOLATED  
NEUTRAL AND A SEMICONDUCTOR CONVERTER FOR  
THE COMPENSATION OF SHORT-CIRCUIT CAPACITIVE CURRENTS**

**Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrazhensky E.B.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

This paper presents the results of the analysis of electromagnetic processes in the compensation of a short-circuit capacitive current by a three-phase static converter in a medium voltage network. The converter is mainly connected to compensate for capacitive currents in a short-circuit mode. A generalized mathematical model of a network with a converter is obtained and the results of mathematical modeling are given under certain assumptions.

*Keywords:* Network with an isolated neutral, compensation of capacitive current, converter, analysis of electromagnetic processes, mathematical modeling.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-1-80-93

REFERENCES

1. Vainshtein R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Rezhimy zazemleniya neutrali v elektricheskikh sistemakh* [Neutral grounding modes in electrical systems]. Tomsk, TPU Publ., 2010. 108 p.
2. Sirota I.M., Kislenco S.N., Mikhailov A.M. *Rezhimy neutrali elektricheskikh setei* [Neutral modes of the electrical networks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985. 264 p.
3. Nazarychev A.N., Pugachev A.A., Titenkov S.S. Kombinirovannoe zazemlenie neutrali v setyakh 6–35 kV. Mify i real'nost' [Combined neutral grounding in 6–35 kV grids. Myths and reality]. *Novosti elektrotekhniki – The News of Electrical Engineering*, 2016, no. 3 (99), pp. 2–5.
4. Mustafa G.M. *Ustroistvo kompensatsii toka zamykaniya na zemlyu v trekhfaznykh elektricheskikh setyakh (varianty)* [Device for earth fault current compensation in three-phase electrical networks (versions)]. Patent RF, no. 252434, 2014.
5. Komska T., Peroutka Z., Matuljak I. A novel least norm-based PWM for a four-leg earth fault compensator. *Proceedings IECON 2014 – 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, 2014, pp. 1118–1123.
6. Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrazhenskiy E.B. *Ustroistvo dlya kompensatsii emkostnykh tokov korotkogo zamykaniya v setyakh s izolirovannoi neutral'yu 6–10 kV* [Device for compensation of capacitive currents of short circuit in networks with isolated neutral 6–10 kV]. Patent RF, no. 148769, 2014.
7. Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrazhenskiy E.B. *Ustroistvo dlya kompensatsii emkostnykh tokov korotkogo zamykaniya v setyakh s izolirovannoi neutral'yu 6–10 kV* [Device for compensation of capacitive currents of short circuit in networks with isolated neutral 6–10 kV]. Patent RF, no. 2626011, 2017.
8. Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrazhenskiy E.B. Symmetrical current components regulator. *15th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Proceedings*, Novosibirsk, Russia, 30 June – 4 July 2014, pp. 473–476.
9. Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrazhenskiy E.B. Compensation of ground fault capacitive current in ungrounded distribution networks by static semi-conductor converter. *17th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016: Proceedings*, Novosibirsk, Russia, 30 June – 4 July 2016, pp. 573–576.
10. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. *Osnovy teorii tsepei* [Basics of circuit theory]. 5th ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 528 p.
11. Levinshtein M.L. *Operatsionnoe ischislenie v zadachakh elektrotekhniki* [Operational calculus for electrical engineering issues]. 2nd ed. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 360 p.
12. Neiman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. V 2 t. T. 1 [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 vol. Vol. 1]. 3rd ed. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 536 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Смирнов Павел Николаевич** – родился в 1991 году, степень магистра в области электроники и электротехники, аспирант, инженер 2 категории, Институт силовой электроники, НГТУ. Область научных интересов: высоковольтные многоуровневые преобразователи электрической энергии, активные силовые фильтры, СТАТКОМы. Опубликовано 13 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: paulsmirnov91@gmail.com).

**Smirnov Pavel Nikolaevich** (b. 1991) – PhD student at the electronics and electrical engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high-voltage multilevel converters of electric energy, active power filters and STATCOMs. He is the author of 13 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: paulsmirnov91@gmail.com).



**Харитонов Сергей Александрович** – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, директор, Институт силовой электроники, заведующий кафедрой электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: силовая электроника, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов. Опубликовано более 320 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: Kharit1@yandex.ru).

**Kharitonov Sergey Alexandrovich** (b. 1950) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, director, Institute of Power Electronics, head of the department of electronics and electrical engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, and power generation systems for autonomous objects. He is the author of more than 320 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Kha-rit1@yandex.ru).



**Преображенский Евгений Борисович** – родился в 1947 году, заведующий лабораториями кафедры электроники и электротехники, Институт силовой электроники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: силовая электроника, системы хранения и генерирования электрической энергии, опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: preob@ngs.ru).

**Preobrazhensky Evgeny Borisovich** (b. 1947) – head of the laboratories, department of electronics and electrical Engineering, Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics and power storage and generation systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: preob@ngs.ru).

Статья поступила 29 ноября 2017 г.  
Received November 29, 2017

## To Reference:

Smirnov P.N., Kharitonov S.A., Preobrazhensky E.B. Analiz protsessov v seti s izolirovannoi neutral'yu i poluprovodnikovym preobrazovatelem dlya kompensatsii emkostnykh tokov korotkogo замыкания [Analysis of processes in a network with an isolated neutral and a semiconductor converter for the compensation of short-circuit capacitive currents]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 1 (38), pp. 80–93. doi: 10.17212/1727-2769-2018-1-80-93.